



# TU Clausthal

Clausthal University of Technology

## **Analyse von Plattenschwingungen mit einem robotergesteuerten 1D Vibrometer zur Charakterisierung des Einflusses lokaler Materialinhomogenitäten**

**Xiaodong Cao, Rico Schmelter, Thorben Ziemer,  
Armin Lohrengel, Christian Rembe**

Technical Report Series

Fac3-16-02



Faculty of  
Mathematics/Computer Science  
and Mechanical Engineering  
Clausthal University of Technology

## Impressum

Publisher: Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau,  
Technische Universität Clausthal  
Am Regenbogen 15, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany  
Editor-in-chief: Alfons Esderts  
Technical editor: Volker Wesling  
Contact: [martina.waechter@tu-clausthal.de](mailto:martina.waechter@tu-clausthal.de)  
URL: <http://www.fakultaet3.tu-clausthal.de/forschung/technical-reports/>  
ISSN: 1869-8018

## The Faculty of Mathematics/Computer Science and Mechanical Engineering Review Board

Prof. Dr. Alfons Esderts  
Prof. Dr. Stefan Hartmann  
Prof. Dr. Olaf Ippisch  
apl. Prof. Dr. Günter Kemnitz  
Prof. Dr. Armin Lohrengel  
Prof. Dr. Norbert Müller  
Prof. Dr. Christian Rembe  
Prof. Dr. Stefanie Retka  
Prof. Dr. Hubert Schwarze  
Prof. Dr. Volker Wesling

# Analyse von Plattenschwingungen mit einem robotergesteuerten 1D Vibrometer zur Charakterisierung des Einflusses lokaler Materialinhomogenitäten

Xiaodong Cao  
Rico Schmelter  
Thorben Ziemer  
Armin Lohrengel  
Christian Rembe

TU Clausthal – Institut für Elektrische Informationstechnik  
Gebäude C14  
Leibnizstraße 28  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
+495323/72-2342

TU Clausthal – Institut für Maschinenwesen  
Robert-Koch-Str. 32  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
+495323/72-2270

## Kurzfassung

Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) ist eine weitverbreitete berührungslose Messmethode zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeit. Schwingformen können mit Hilfe von Rastertechnik gemessen werden und ermöglichen zusammen mit Schwingungsamplitudengängen die Verifikation von Modalanalysesimulationen. Den Stand der Technik stellen sogenannte Scanning-Laser-Doppler Vibrometer (SLDV) dar, die mit einem einzelnen Messkopf die Schwingungen aus der Ebene von Oberflächen messen können. Mit Hilfe von drei Messköpfen, die aus drei Richtungen erfassen, können dreidimensionale (3D) Schwingungen auf komplexen 3D Oberflächen gemessen werden. In diesem Report wird eine alternative Lösung für 3D-Schwingungsmessungen mit SLDV vorgestellt, welche durch die Kombination aus einem 6-Achs Industrieroboter und einem 1D-LDV realisiert wird. Unsere Lösung ist einfacher und auch flexibler, erfordert aber längere Messzeiten. Wir demonstrieren unseren Aufbau mit Beispielmessungen zur Untersuchung des Einflusses lokaler, laserinduzierter Materialinhomogenitäten auf Plattenschwingen. Derartige lokale Eigenschaftsänderungen könnten in Zukunft zur Realisierung schwingungsoptimierter Systeme eingesetzt werden. Die gemessenen Spektren und einige Schwingformen verschiedener Bleche werden dargestellt.

## Abstract

Laser-Doppler vibrometry (LDV) is a widely applied non-contact technique to measure vibration velocities evaluated to derive vibration spectra. Scanning methods enable the measurement of operational deflection shapes and the measurement data allows the verification of modal testing efficiently. State-of-the-art for vibration measurements with this technique is the scanning laser Doppler vibrometer (SLDV) for 2D structures like plates. Measuring with three SLDVs simultaneously is a well-known solution to obtain 3D vibrations in complex mechanical structures. In this report, we demonstrate an alternative solution by combining a 1D LDV and a 6-axis industrial robot. Our solution is simpler and, as well, more flexible. However, it requires longer measurement procedures. We demonstrate our setup by measuring the influence of welds in plates on the vibration behavior. Such welds aim to improve acoustic noise generation in noise-optimized technical systems. We present the vibration spectra and selected operational deflection shapes (ODS). Thus, our measurement results reveal the influence of local vibrational property alterations.

## 1 Einleitung

Gegenüber dem Messen mit Beschleunigungssensoren ist der Messaufwand mit Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV), insbesondere bei flächenhaften Messungen, erheblich geringer. Es gibt auch weniger Einschränkungen bei Messobjekten, da auch sehr kleine, sehr leichte, sehr heiße oder rotierende Objekte mit LDV problemlos untersucht werden können ([1], [2]). Überall wo das Anbringen von Beschleunigungssensoren nur sehr schwer möglich ist, ist die Laser-Doppler-Vibrometrie besonders vorteilhaft.

Der Stand der Technik zur Oberflächenschwingungsmessung mit LDV bei reproduzierbaren Schwingungen ist das Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV). Die Messpunkte werden dabei nacheinander abgerastert, wobei der Schwingungsvorgang für jede Messung exakt wiederholt werden muss. Das Rastern erfolgt durch die Veränderung der Winkeleinstellungen von Spiegeln im Vibrometer, die mit speziellen Galvo-Motoren ausgelenkt werden. In diesem Report wird ein alternatives Messverfahren dazu vorgestellt, welches 2002 von Armburster und Selbach vorgeschlagen worden ist [3], und bei dem ein einziges 1D-LDV mit einem Industrieroboter kombiniert wird. Dieses Messverfahren ist im Vergleich zum SLDV günstiger und in vielen Fällen auch flexibler. Durch das dreimalige Messen am selben Messpunkt aus drei unterschiedlichen Messrichtungen sind auch 3D-Messungen mit diesem Verfahren möglich. Allerdings ist die Positionierung aufwändiger und somit ist die Messprozedur langwieriger. Außerdem kann im Videobild nicht direkt kontrolliert werden, ob sich die Messstrahlen für eine 3D-Messung in genau einem Punkt treffen, sondern die Stellen der drei Messpunkte müssen nacheinander erfasst werden. Dafür treten Übersprecheffekte zwischen den Lasern prinzipbedingt nicht auf. Angewendet wird dieses Verfahren auf die Vermessung des Einflusses von lokalen Laserbehandlungen auf das akustische Systemverhalten von Blechstrukturen. Die durch den Laser eingebrachten Strukturen reduzieren den Energieübertrag der akustischen Wellen,

## 2 Beschreibung des Messsystems

Für das automatische Scannen des Messrasters kommt ein 6-Achs-Industrieroboter RX90L der Firma STÄUBLI zum Einsatz. In Tabelle 1 sind einige Kenndaten vom RX90L aufgelistet. Die Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Manipulators des Robotersystems.

Tabelle 1: einige Kennzahlen des RX90L [4]

<b>Längen</b>	
Oberarm	450 mm
Unterarm	650 mm
Hand	85 mm
<b>max. Geschwindigkeit</b>	12,6 m/s (im Lastschwerpunkt)
<b>Wiederholgenauigkeit</b>	$\pm 0,025$ mm (bei konst. Temperatur)
<b>max. Last</b>	3,5 kg / 6 kg (alle/reduzierte Geschwindigkeiten)

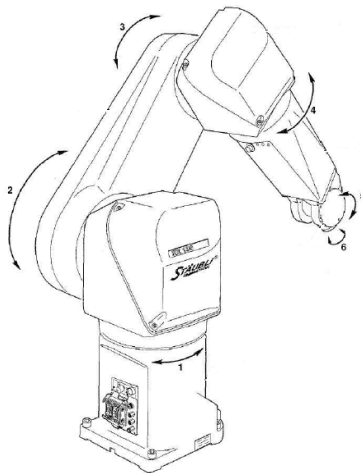


Abbildung 1: STÄUBLI RX90L [4]

Für die Schwingungsmessung wird das 1D-LDV PDV 100 der Firma Polytec verwendet. Das PDV 100 mit einem Helium-Neon-Laser (633 nm Wellenlänge) hat einen Messbereich von 0,5 Hz bis 22 kHz [5]. Die Messdatenerfassung erfolgt über den mitgelieferten Analog-Digital-Umsetzer (ADU) VIB-E220 USB Data Acquisition Unit und die gewonnenen Messdaten werden am Messrechner mit der Polytec-Software VibSoft 5.1 bearbeitet.

Die Abbildung 2 stellt alle Prozessschritte von einer typischen Rastermessung unserer Lösung für Laservibrometermessungen dar. Bevor die Messung gestartet wird, wird der Messstrahl an einigen Punkten mit bekannten Koordinaten nacheinander ausgerichtet, um das Messgitter an die reale Position des Messobjekts anzupassen. Nach der Festlegung des Messgitters wird die Laufbahn des Roboterarms zum Rastern geplant. Mit Hilfe eines Matlab®-Programms werden das Robotersteuerprogramm und die Messsoftware (VibSoft) des Vibrometers in einem Steuerprogramm vereint und somit der Messprozess vollständig automatisiert [6]. Die Messdaten werden in eine Matlab®-Datei nach Messpunkten sortiert und abgespeichert. Die Darstellung der Schwingform für eine einzelne selektierte Frequenzlinie ist mit Hilfe eines eigenen Matlab®-Codes sowohl als Animation als auch als Bild bei bestimmter Phasenlage möglich.

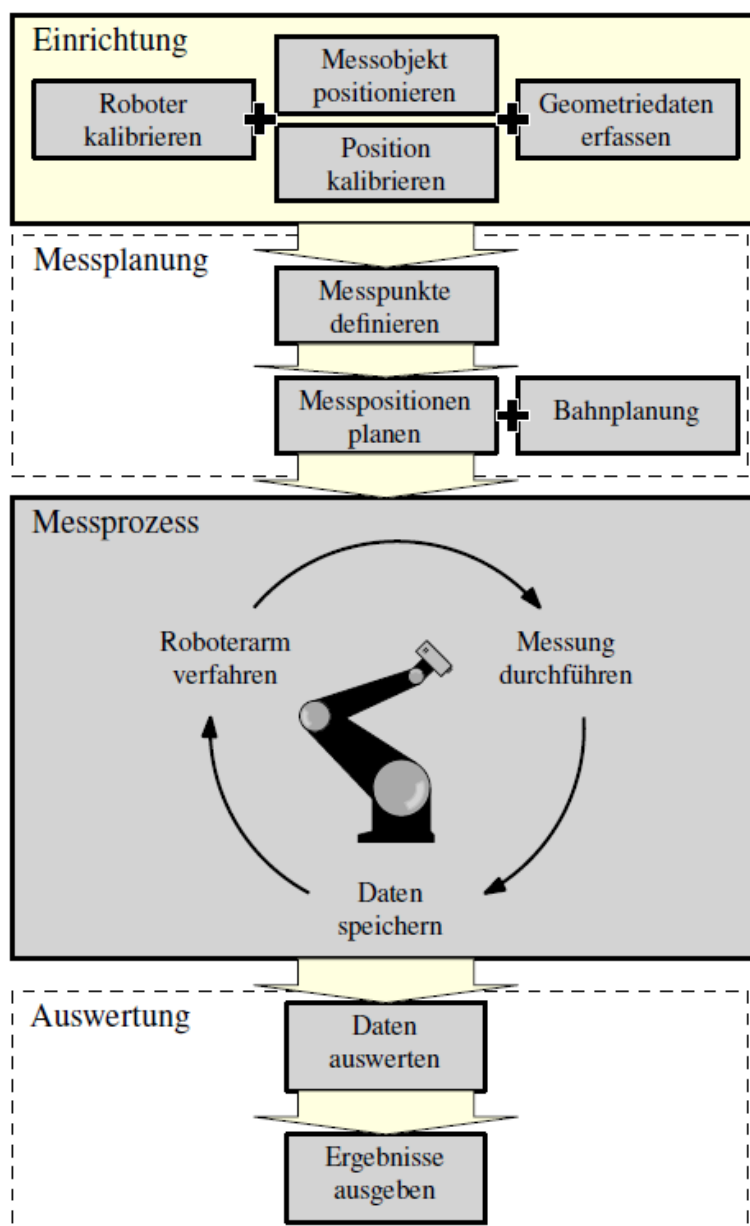


Abbildung 2: Prozessschritte der robotergestützten Messung

## 2.1 Ermittlung der 3D-Geschwindigkeit des Messpunktes

Um den 3D-Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  eines Messpunktes mit dem Messsystem zu erfassen wird der Punkt drei Mal nacheinander aus drei voneinander linear unabhängigen Messrichtungen gemessen. Die jeweils gemessenen Geschwindigkeiten  $v_{m,1}$ ,  $v_{m,2}$  und  $v_{m,3}$  entsprechen den einzelnen Geschwindigkeitskomponenten des Messgeschwindigkeitsvektors  $\vec{v}_m = (v_{m,1} \ v_{m,2} \ v_{m,3})^T$  mit der zugehörigen Basisvektormatrix  $E = [\vec{e}_{m,1} \ \vec{e}_{m,2} \ \vec{e}_{m,3}]^T$ . Es gilt somit

$$\vec{v} \Leftrightarrow E\vec{v} = E^{-1}\vec{v}_m. \quad (1)$$

Diese Umrechnung basiert lediglich auf der Koordinatentransformation und ist daher sowohl für die Geschwindigkeit als auch für die Verschiebung gültig:

$$\vec{x} = E^{-1}\vec{x}_m. \quad (2)$$

## 3 Bleche mit eingebrachten lokalen Inhomogenitäten

Im Automobilbau und im allgemeinen Maschinenbau sind oft große Blechstrukturen vorhanden, welche maßgeblich zur Schallabstrahlung beitragen, selbst aber keine Quelle von Schwingungen darstellen. Vor allem im Automobilbau wird dabei viel Aufwand betrieben, diese ungewollten Schwingungen durch dämpfende Oberflächenbeläge zu verringern. Solche Dämpfungsfolien erzeugen zu einem zusätzliche Kosten, zum anderen erhöhen diese die Masse des Automobils und somit seinen Verbrauch und Schadstoffausstoß.

In diesem Beitrag wurde ein Stahlblech aus LH800 (Werkstoff-Nr. 1.7734) von Salzgitter Flachstahl verwendet, weil dieser Stahl lokale Veränderungen der Materialeigenschaften durch Wärmeübertrag begünstigt. Durch Laserbehandlung auf das Material des Stahlblechs lassen sich im homogenen Werkstoff Inhomogenitäten erzeugen, welche härter oder weicher als das umgebende Material sein können. Diese Inhomogenitäten können die Ausbreitung von Körperschall in der Struktur beeinflussen bzw. leiten und ggf. als akustische Schranken wirken. Somit wäre es möglich, Körperschall kommend von lokalen Quellen, gezielt aus der Blechstruktur auszuschließen und somit die abgestrahlte Schallleistung zu beeinflussen und mit gezieltem Design sogar zu verringern.

## 4 Angewandte Methoden

Insgesamt zwei Bleche aus LH800 (Kaltband, Lieferzustand weich, unbehandelt) wurden mit dem vorgestellten Messsystem untersucht. Die verwendeten Lasereinstellungen können der Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Überblick der untersuchten Bleche

Material	Leistung	Vorschub	Fokuslage
LH800	0	0	0
LH800	2 kW	2 m/min	10

Beide Bleche haben eine Größe von 300x300x1,5 mm und müssen für eine Messung der Schwingformen möglichst so gehalten werden, dass keine Dissipation von Schallwellen über die Halterung erfolgt. Daher sollte die akustische Impedanz der Halterung möglichst vernachlässigbar sein. Um den Einfluss auf die freien Schwingformen zu minimieren, wurden die Bleche möglichst senkrecht an ihren vier Ecken mit Gummispannseilen aufgehängt, welche die Anforderung an eine weiche Aufhängung sehr gut erfüllen. Da auf Grund der Geometrie der Bleche die Geschwindigkeitskomponenten in der Ebene vernachlässigt werden können, wurde der Messstrahl zur Optimierung der Signalstärke senkrecht auf das Blech ausgerichtet. Die Anregungsstelle befand sich auf der Rückseite des Bleches möglichst nahe an der oberen rechten Ecke (Abbildung 3).

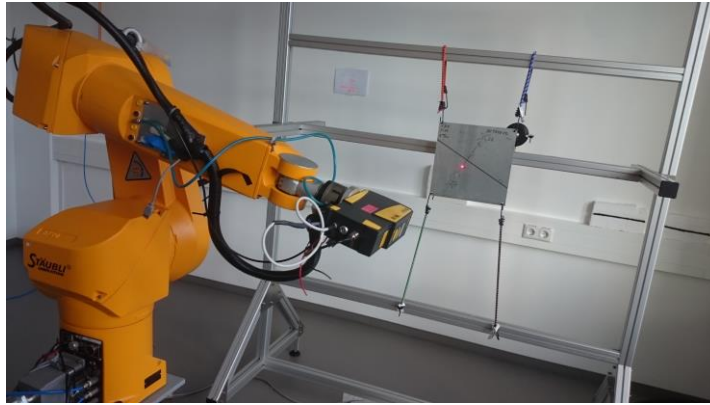


Abbildung 3: Messaufbau

Als Anregungsquelle wurde ein Mini-Shaker Type 4810 der Firma Brüel & Kjær verwendet. Der Shaker kann einen weiten Frequenzbereich von DC bis 18 kHz anregen und ist somit für diese Anwendung gut geeignet. Als Anregungssignal wurde ein Periodic-Chirp verwendet. Dieses Anregungssignal besitzt eine konstante Amplitude über den gesamten angeregten Frequenzbereich und die Phasen der einzelnen Frequenzlinien, die mit den Frequenzen des gemessenen Spektrums übereinstimmen, werden so angepasst, dass die mittlere Signalleistung bei gegebener Amplitude das Maximum erreicht [7]. Damit die gemessenen Schwingformen der unterschiedlichen Blechvarianten miteinander verglichen werden können, wurde die Ausgangsleistung des Verstärkers zum Shaker für alle Messungen gleich gehalten. Die wesentlichen Einstellungen, die für die Messungen verwendet wurden, sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Verwendete Einstellungen für die Messung

<b>Anregungssignal</b>	Periodic Chirp	<b>Anregungsfrequenzbereich</b>	0 – 15 kHz
<b>Messkanal</b>	Vibrometer	<b>Referenzkanal</b>	Kraftsensor
<b>Abtastfrequenz</b>	48 kHz	<b>Messdauer</b>	640 ms
<b>Mittelung</b>	5 (komplex)	<b>Messfrequenzbereich</b>	0 – 20 kHz

Zur Optimierung der Datenmenge wurde ein rechteckiges Messgitter mit einer Punktzahl in der Größenordnung von 1000 Punkten für beide Blechvariante festgelegt. Der Abstand der benachbarten Messpunkte betrug 5 mm. Laut der Faustregel soll der Punktabstand nicht größer als 1/10 der Wellenlänge sein [8]. Unter der Annahme, dass die Schwingung hauptsächlich aus Biegewellen besteht, liegt die Biegewellenlänge  $\lambda_B$  gemäß der Gleichung [9]

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{2\pi}{f}} \sqrt{\frac{Eh^2}{12(1-\mu^2)\rho}} \quad (3)$$

bei einer Frequenz  $f$  von 6000 Hz bei  $\lambda_B = 50$  mm. Dabei ist  $E$  der Elastizitätsmodul,  $h$  die Blechdicke,  $\mu$  die Querkontraktionszahl und  $\rho$  die Dichte. Somit ist die gemessene Schwingform bis zu dieser Frequenz fein genug aufgelöst. Die Messfläche beträgt 190 x 150 mm, somit erhält man mit dem genannten Punkteabstand insgesamt 1209 Messpunkte. Der Anregungspunkt liegt in der Nähe der rechten oberen Ecke der Messfläche (Abbildung 4).

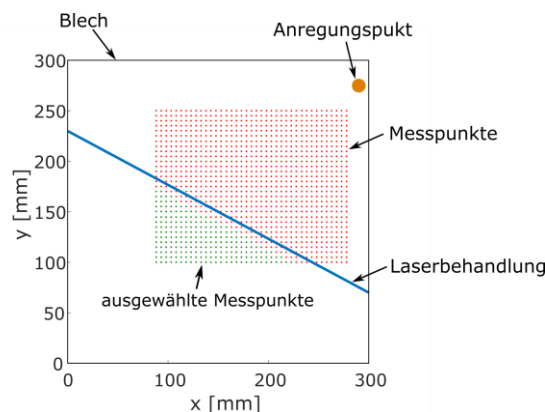


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Blechstruktur (modifiziert) und der Messpunkte (rot und grün)

Mit den Inhomogenitäten soll der Energiefluss der Schallwellen beeinflusst werden und durch die Reflexion an der Laserbehandlung soll die Schwingungsleistung hinter der Laserbehandlung reduziert werden. Um den Einfluss dieser Modifikation zu untersuchen, wurden die Summenpegel der Schnelle aus den Messpunkten hinter dem laserbehandelten Bereich von beiden Blechvarianten gebildet. Die für die Auswertung der Summenpegel ausgewählten Messpunkte sind in Abbildung 4 grün dargestellt. Der Summenpegel der Schnelle  $L_{v,ges}$  wurde nach

$$L_{v,ges} = 10 \cdot \lg \left( \frac{\sum_{i=1}^n \hat{v}_i^2}{v_0^2} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

berechnet. Dabei ist  $\hat{v}_i$  die Geschwindigkeitsamplitude des einzelnen Messpunktes und  $v_0$  der Referenzwert. Für die Auswertungen in diesem Report wurde  $v_0 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  (DIN EN 21683:1994) eingesetzt.

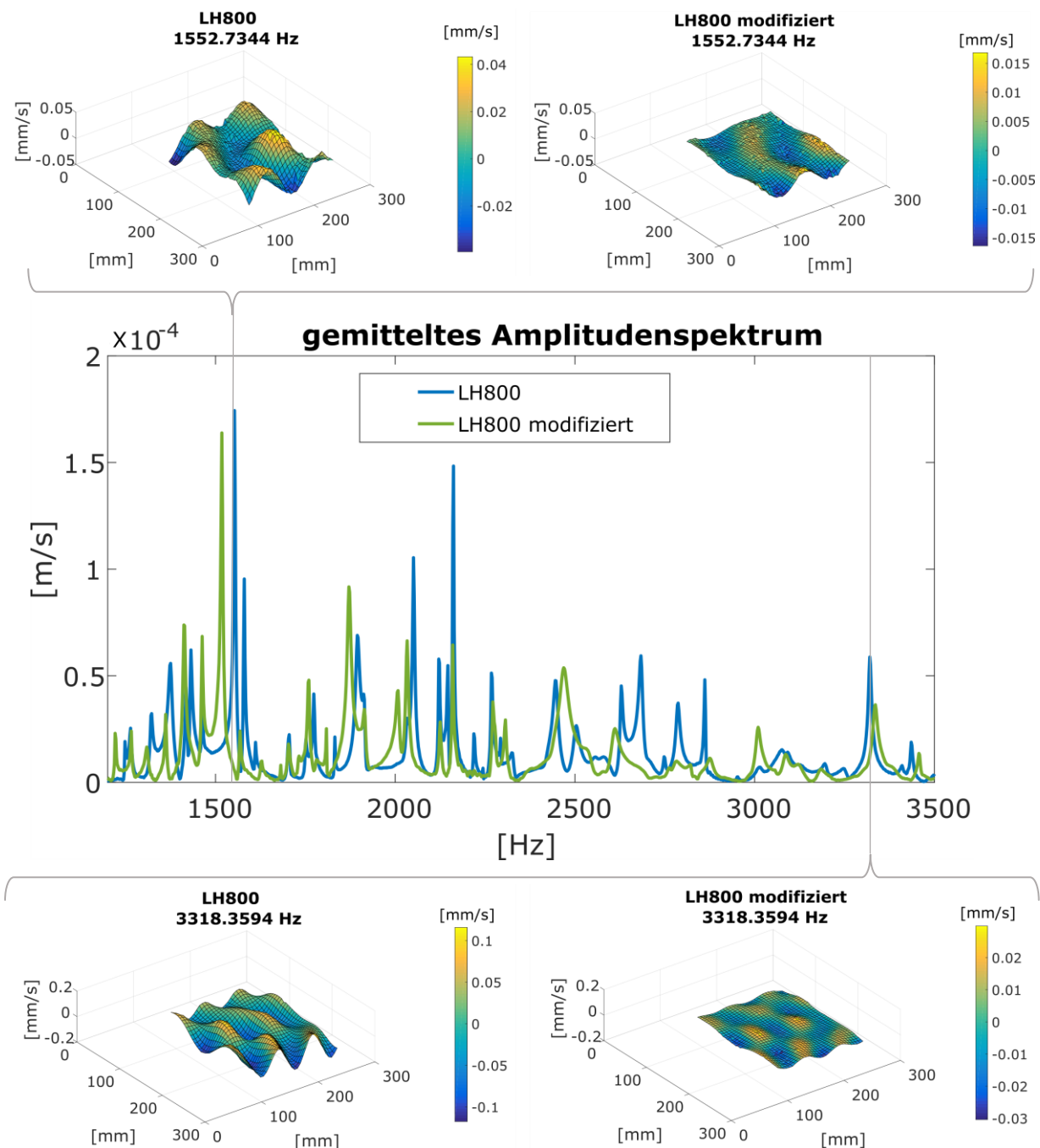


Abbildung 5: Gemitteltetes Amplitudenspektrum und Schwingformen bei zwei ausgewählten Frequenzen



## 4.1 Messergebnisse

In Abbildung 5 sind die gemessenen Amplitudenspektren der beiden Blechvarianten von 1200 Hz bis 3500 Hz dargestellt. Die Amplitudenspektren wurden über alle Messpunkte (vgl. Abbildung 4) gemittelt. Das Spektrum von LH800 ist in Blau und LH800 (modifiziert) in Grün dargestellt.

An zwei Frequenzpunkten im dargestellten Frequenzbereich (1553 Hz und 3318 Hz) werden die zugehörigen Schwingformen nebeneinander dargestellt (Abbildung 5 oben und unten). Die horizontalen Achsen werden jeweils von 0 bis 300 mm angezeigt und markieren somit die gesamte Blechoberfläche. Die vertikale Achse ist jeweils gleichmäßig skaliert und gibt die Geschwindigkeit des Messpunktes an. Die Falschfarbendarstellung läuft jeweils von Minimum (in Blau) bis Maximum (in Gelb), die Zuordnung zu den Amplituden ist im Farbbalken dargestellt. Das Beispiel bei 1553 Hz zeigt eine Schwingform, die sich durch Verschieben der Resonanz sehr verändert hat. Das Beispiel bei 3313 Hz zeigt eine Schwingform, die sich trotz der eingebrachten Inhomogenität kaum in der Form, aber in der Amplitude unterscheidet.

In Abbildung 6 sind die nach Gl. (4) berechneten Summenpegel der ausgewählten Messpunkte beider Blechvarianten als Terzspektrum dargestellt.

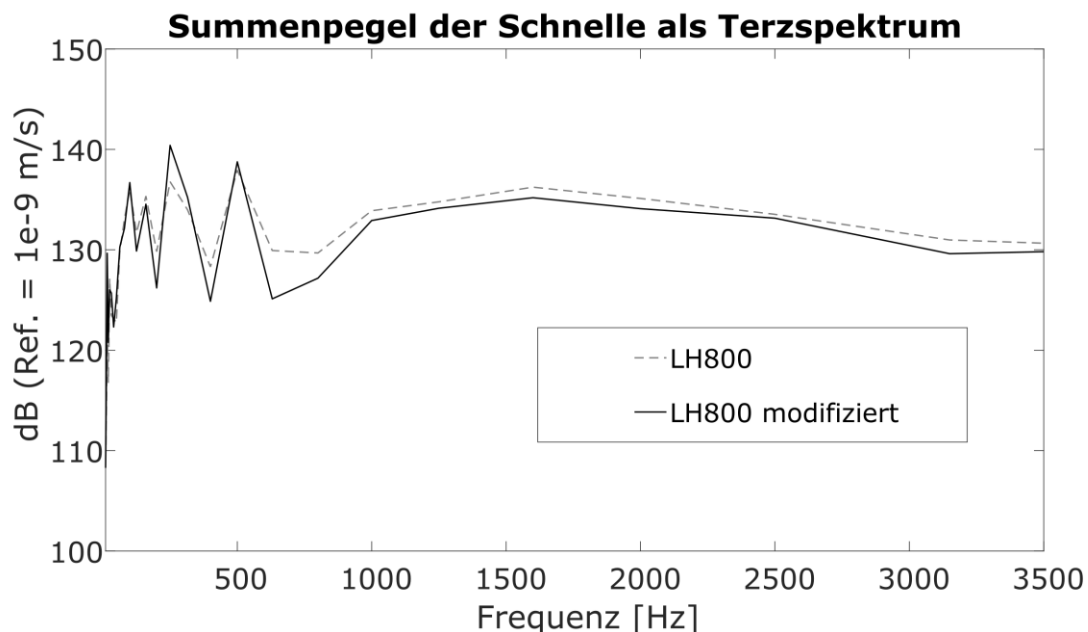


Abbildung 6: Summenpegel der Schnelle aus Messpunkte im Bereich hinter der Laserbehandlung

Es ist zu erkennen, dass der Summenpegel der Schnelle für die in Abbildung 4 grün dargestellten Messpunkte und somit auch die Energieausbreitung durch die Modifikation beeinflusst werden kann. In diesem Fall wies das modifizierte Blech einen reduzierten Summenpegel im Frequenzbereich von 500 Hz bis 3500 Hz auf. Auch wenn die Wirkung der Inhomogenität in diesem ersten Beispiel noch gering ist, zeigt das Ergebnis, dass unser Verfahren die Bewertung der Auswirkungen von lokal eingebrachten Inhomogenitäten erlaubt.

## 5 Zusammenfassung

Scanning-Laser-Doppler-Vibrometrie ist als leistungsfähiges kontaktloses Verfahren zum Messen von Schwingungen allgemein in den Ingenieurwissenschaften anerkannt und wird als ein Standardmessverfahren genutzt. Die übliche Lösung für 2D-Messungen besteht aus einem Lasersensor mit Galvo-Scanning-Spiegeln, mit denen die Oberfläche punktwise abgerastert werden kann. Für 3D-Schwingungsmessungen werden drei Scanning-Messköpfe eingesetzt, welche die Schwingung gleichzeitig aus drei Richtungen messen. Diese Lösung mit drei Messköpfen ist in der Kombination mit einem Roboter bekannt. Von Armbruster und Selbach wurde 2002 [3] ein alternatives Verfahren vorgeschlagen, bei dem ein Roboter einen Einpunktkopf positioniert und man mit drei sequentiell aufgenommenen Schwingungsmessungen aus drei unterschiedlichen Richtungen einen 3D-Messdatensatz zusammenführt. Dieses Verfahren wurde von unserer Gruppe nun erstmals in ein funktionierendes System umgesetzt [6].

In dieser Arbeit haben wir die Anwendung unseres Systems auf die Schwingungsmessung an Stahlplatten mit durch Schweißnähten eingebrachten Inhomogenitäten demonstriert. Unsere Messungen zeigen die Änderungen im Amplitudenfrequenzgang und in den Schwingformen. Aus diesen Messungen kann der Einfluss der Inhomogenitäten auf die spektrale Leistungsverteilung der Schwingung in Abhängigkeit von der Position auf der Oberfläche bestimmt werden.

In zukünftigen Projekten möchten wir die Möglichkeiten für ein akustisch optimiertes Design von Maschinen mit gezielt eingebrachten Inhomogenitäten weiter erforschen und dafür das hier gezeigte Messsystem und -verfahren systematisch anwenden. Für die Analyse des Einflusses von eingebrachten Inhomogenitäten bei transienten Schwingungsvorgängen möchten wir in Zukunft Mehrkanal-Laservibrometrie einsetzen [10].

## Literaturverzeichnis

- [1] Pickering, C. J. D.; Halliwell, N. A.; Wilmschurst, T. H.: The laser vibrometer: A portable instrument. In: *Journal of Sound and Vibration* 107 (1986), Nr. 3, S. 471-485
- [2] Rembe, C.; Siegmund, G.; Steger, H.; Wörtge, M.: Measuring MEMS in Motion by Laser Doppler Vibrometry. In: Osten, W. (Hrsg.): *Optical inspection of microsystems* Bd. 109. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2007, S. 245-292. – ISBN 0-8493-3682-1
- [3] Armbruster, B.; Selbach, H.: *Messvorrichtung zum berührungslosen Erfassen von Schwingungen eines Objektes*. EP 1431740 B1. März 2006. – Polytec GmbH, Patent
- [4] Stäubli Faverges SCA (Org.): *Robot RX90-RX90L, CS7 – Instruction Manual*. Place Robert Stäubli., F-74210 Faverges, 1996
- [5] Polytec GmbH (Org.): *User Manual Portable Digital Vibrometer PDV 100*. Polytec-Platz 1-7, D-76337 Waldbronn, 2004
- [6] Ziemer, T.; Rembe, C.: Demonstration of a 3D vibration measurement with a single-point laser Doppler vibrometer and a 6-axis industrial robot, submitted to: Int. Symp. On Optomechatr. Techn., Tokyo, Japan, 2016
- [7] Polytec GmbH (Org.): *Polytec Vibrometer Software 5.1: Theory Manual*. Polytec-Platz 1-7, D-76337 Waldbronn
- [8] Möser, M.; Kropp, W.: *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – ISBN 978-3-540-49048-7
- [9] Kollmann, Franz G.; Angert, Roland; Schösser, Thomas F.: *Praktische Maschinenakustik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (VDI-Buch). – ISBN 3-540-20094-0
- [10] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, F. Ritter, K. Sandfort, C. Rembe, K. Bendel, Multipoint Vibrometry with Dynamic and Static Holograms, *Rev. Sci. Instrum.* 84 (2013), 121701